

# 実験トランジスタ・アンプ設計講座

黒田 徹

## ●実用技術編

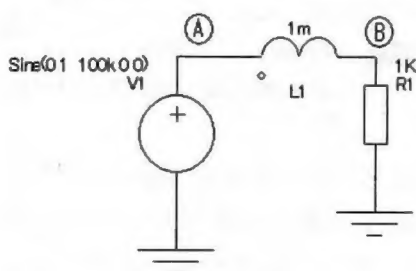
### 第10章 回路シミュレータ SPICE 入門 (20)

#### リサージュ図形とは

互いに直角方向に振動する2つの単振動を合成して得られる平面図形を、リサージュ図形といいます、フランスの J. A. Lissajous が 1885 年に考案しました。

リサージュ図形の定義はわかりにくいので、具体的に説明します。まず“単振動”ですが、これは正弦波(サイン波やコサイン波)です。「互いに直角方向に振動する2つの単振動を合成して得られる平面図形」とは、XY 直交平面において、

$$\begin{aligned} x &= A \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) \\ &\dots\dots\dots(10-61a) \\ y &= B \sin(2\pi f_2 t + \phi_2) \end{aligned}$$



〈第1図〉 ローパス・フィルタ。入力 100 kHz サイン波

.....(10-61b)  
 という (x, y) 座標の曲線を意味します。周波数  $f_1$  と  $f_2$  の比が整数の場合は、比較的単純な図形になります。

【例1】 周波数  $f_1 = f_2$ , かつ位相  $\phi_1 = \phi_2$  の場合、

$$\begin{aligned} x &= A \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) \\ &\dots\dots\dots(10-62a) \\ y &= B \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) \\ &\dots\dots\dots(10-62b) \end{aligned}$$

となるので、  
 $y/x = B/A$   
 が成り立ちます。すなわちリサージュ図形は、  
 $y = (B/A)x \dots\dots(10-63)$   
 という直線です。

【例2】 周波数  $f_1 = f_2$ , かつ位相  $\phi_2$  が  $\phi_1$  より  $90^\circ$  進んでいる場合、

$$\begin{aligned} x &= A \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) \\ &\dots\dots\dots(10-64a) \\ y &= B \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) \end{aligned}$$

.....(10-64b)  
 となります。任意の位相  $\theta$  に対し、  
 $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \dots\dots(10-65)$   
 なので、(10-64)式から  
 $(x/A)^2 + (y/B)^2 = 1$   
 .....(10-66)  
 が導かれます。つまり、リサージュ図形は楕円です。

#### LPF のリサージュ図形

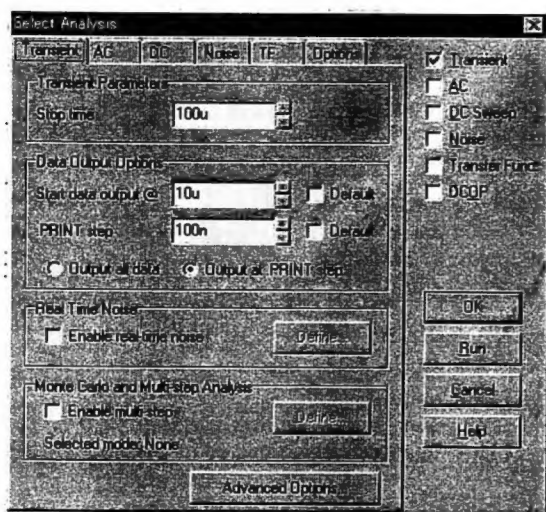
第1図の LPF の入力電圧を X 座標、出力電圧を Y 座標にとってリサージュ図形を描いてみましょう。SIMetrix で第1図の回路を作成します。

$L1 = 1 \text{ mH}$ ,  $R1 = 1 \text{ k}\Omega$  とします。V1 は片ピーク振幅 = 1 V,  $f = 100 \text{ kHz}$  のサイン波です。

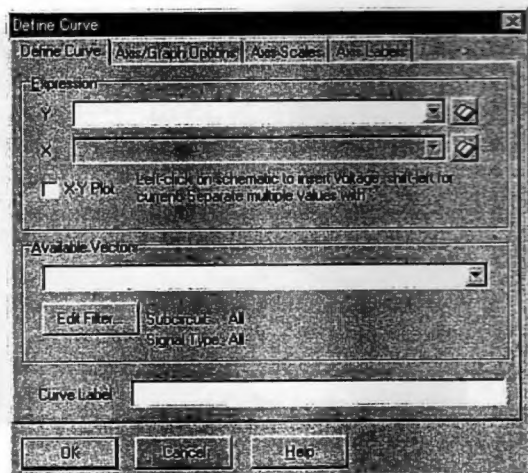
#### (1) 過渡解析の設定と実行

リサージュ図形を描くには、まず過渡解析を実行する必要があります。メニューから [Simulator] → [Choose Analysis...] をクリックし、現れたダイアログボックスを第2図のように編集します。すなわち、  
 Stop time : 100 us  
 Start data output@ : 10 us  
 .PRINT step : 100 ns  
 とします。

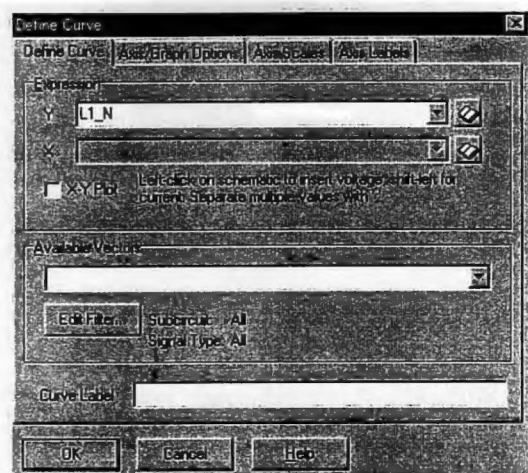
Output all data/Output at .PRINT step の選択は、かならず後者を指定します。解析の種類は Transient をチェックします。



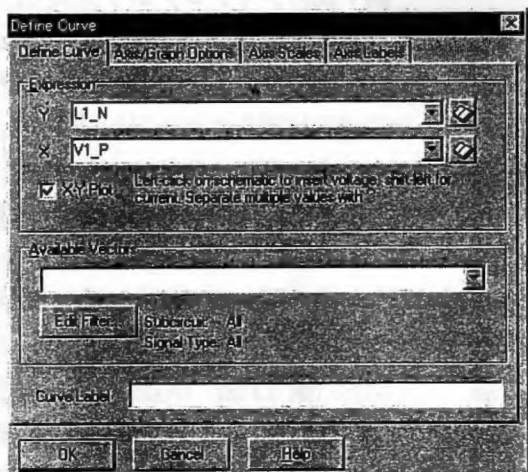
〈第2図〉 過渡解析の設定



◀(第3図) Define Curve ダイアログボックス



◀(第4図) ▶  
第1図B点の真下の配線をクリックするとYにL1\_Nが入力される



◀(第5図) Define Curve ダイアログボックスの最終画面

設定がすんだら、ダイアログボックスの Run ボタンを押してください。

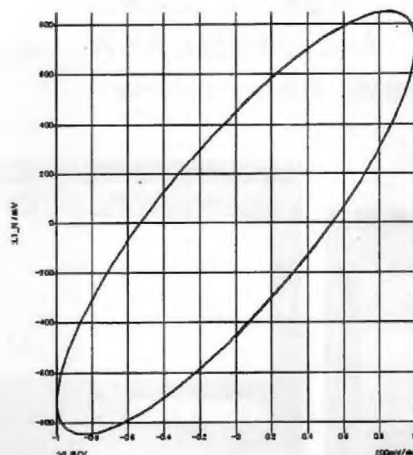
## (2) リサージュ図形を描く

Run ボタンを押してもグラフは表示されません。リサージュを描くには、つぎの操作をします。

**[手順1]** メニューから [Probe] → [Add Curve...] をクリックします。Define Curve ダイアログボックス (第3図) が現れます。もし、ダイアログボックスが回路図と重なっているときは、ダイアログボックスを回路図と重ならない位置まで移動してください。

**[手順2]** ダイアログボックスの設定: 最初に Expression(式)の Y (すなわち Y 座標の変数) を設定します。ここには、第1図の L1 と R1 の接続点のノード名を入力します。ノード名を入力するには以下の操作を行います。

描画ウィンドウの十字カーソルを L1 と R1 の接続点 (第1図の B 点の真下の配線) に当て、クリックします。すると第3図の Y 入力ボックスに、L1\_N という文字が自動的に入ります。L1\_N はインダクタ L1 の一側端子のノード名です。このノードは R1 の+側端子 R1\_P に接続されているので、Y として R1\_P が自



◀(第6図) 第1図の LPF のリサージュ図形。  
Y: 入力, X: 出力, f=100 kHz

動的に入力される場合もありますが、別に問題ありません。

つぎに第4図のダイアログボックスの X-Y Plot のチェックボックスをクリックしてから、描画ウィンドウの十字カーソルを第1図の A 点の真下の配線に当て、クリックします。すると、第5図のように X 座標の変数が設定されます。これで、ノード V1\_P の電圧 (すなわち入力電圧) とノード L1\_N の電圧 (すなわち出力電圧) のリサージュ図形を描く設定になりました。

**[手順3]** グラフ描画: 第5図のダイアログボックスの [OK] ボタンを押してください。ただちに第6図のリサージュ図形が表示されます。

## LPF のカットオフ周波数を変化させる

第1図の LPF のカットオフ周波数  $f_c$  は、

$$f_c = 1/2\pi T \dots\dots\dots(10-67)$$

$$\text{ただし, } T = L_1/R_1 \dots\dots\dots(10-68)$$

$R_1$  の値を 100  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  に切り換えると、カットオフ周波数は、それぞれ 15.915 kHz, 159.15 kHz, 1.5915 MHz になります。各リサージュ図形を描きましょう。

**[手順1]** Multi-Step の設定: 第1図の回路図のメニューから [Simulator] → [Choose Analy-

## 周波数比 2 のリサージュ図形

1 kHz サイン波と 2 kHz サイン波のリサージュ図形を描いてみましょう。SIMetrix で第 14 図の回路を作成します。

V1:  $f=1\text{ kHz}$ , 振幅=1 V, 位相=0

V2:  $f=2\text{ kHz}$ , 振幅=1 V, 位相=0

とします。

メニューから [Simulator] → [Choose Analysis...] をクリックし、現れたダイアログボックスを第 15 図のように設定し、[Run] ボタンをクリックします。つぎにメニューから [Probe] → [Add Curve...] をクリックし、現れたダイアログボックスを第 16 図のように編集します。すなわち、

Expression

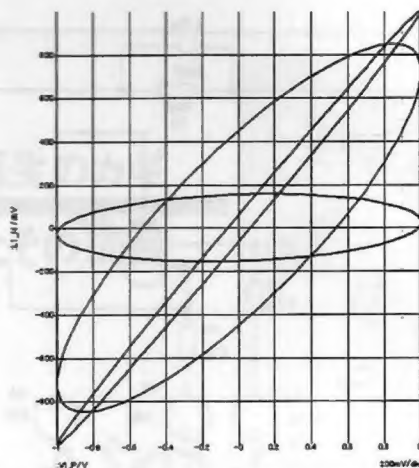
Y: V2\_P

X: V1\_P

☒ X-Y Plot

とします。Y と X の入力はダイレクトに文字を書き込むか、または、上記のように回路図で V2 の + 側端子や V1 の + 側端子に十字カーソルを当てクリックすれば、自動的に入力されます。

そして第 16 図のダイアログボックスの [OK] ボタンをクリックする



〈第 13 図〉 本来のリサージュ図形

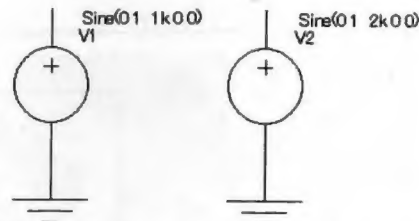
と、すぐに第 17 図のリサージュ図形が表示されます。

### (1) 1 kHz サイン波の位相を $45^\circ$ に設定したときの図形

第 14 図の V1 のシンボルをクリックして選択し、つぎに F7 キーを押してください。現れたダイアログボックスの Phase を  $45$  とします。[OK] ボタンをクリックして回路図に戻り、F9 キーを押して Run します。そしてメニューから [Probe] → [Add Curve...] をクリックし現れたダイアログボックスを第 16 図のように設定して [OK] ボタンをクリックすると、第 18 図のリサージュ図形が表示されます。この曲線は、放物線  $y=2x^2-1$  です。リサージュ図形が放物線になることは、

$$x=\sin(\omega t+\pi/4)$$

$$y=\sin(2\omega t)$$



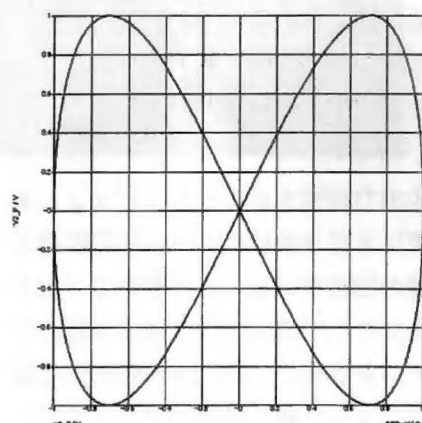
〈第 14 図〉 1 kHz, 2 kHz の電圧源を配置する

から容易に導かれます。

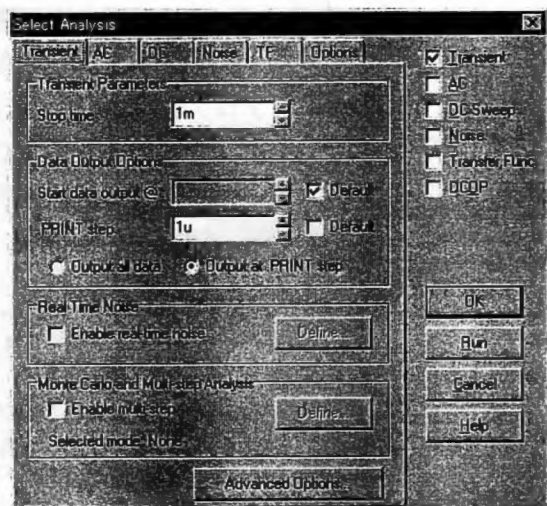
## 真空管アンプの入出力特性

DC アンプの入出力特性は、DC スイープ解析でシミュレーションできますが、真空管アンプのように DC 成分が伝達されない増幅器は DC スイープ解析を適用できません。

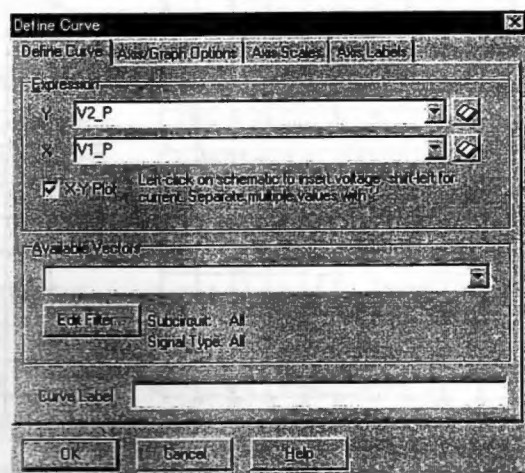
しかし、リサージュ図形を描くことにより、入出力特性をシミュレーションできます。一例として、竹森幹郎氏の設計・製作された「EL 34 三結シングル・パワーアンプ」<sup>(1)</sup>の



〈第 17 図〉 第 14 図回路のリサージュ図形。X: V1, Y: V2

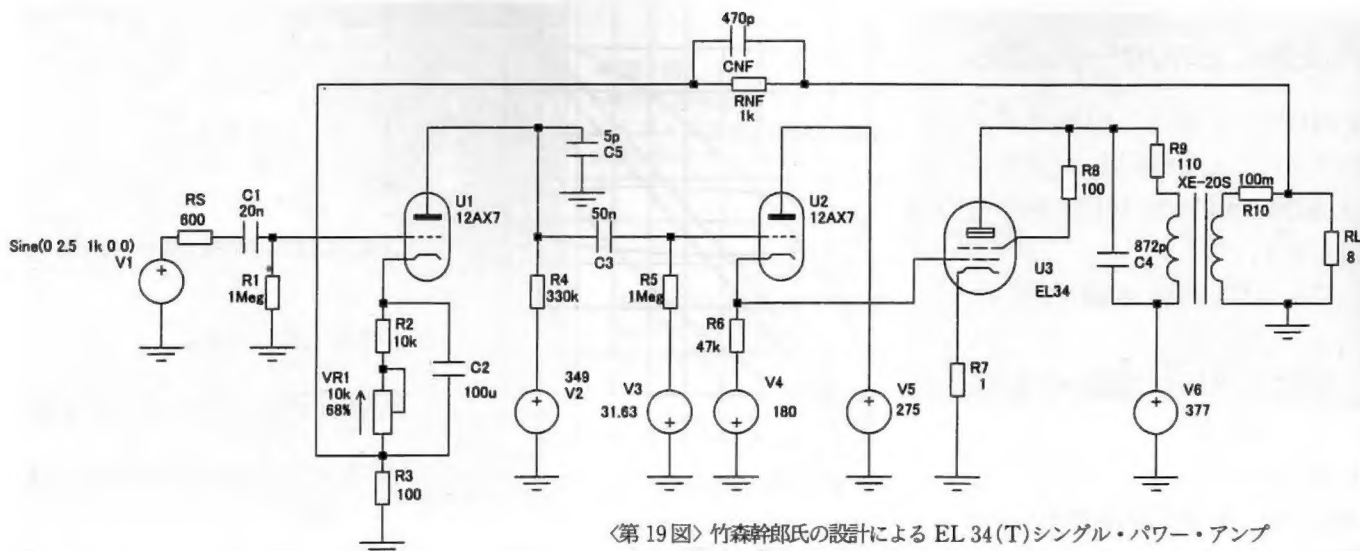


〈第 15 図〉 過渡解析の設定  
•PRINT Step は 1 us, Output at  
•PRINT step を指定する

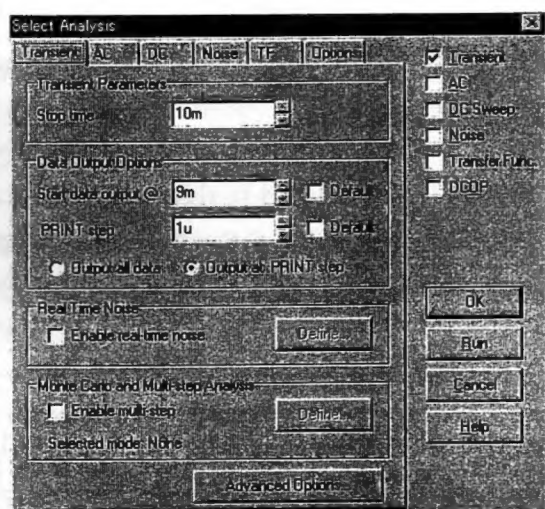


〈第 16 図〉 Define Curve ダイアログボックスの設定  
Y: V2\_P, X: V1\_P

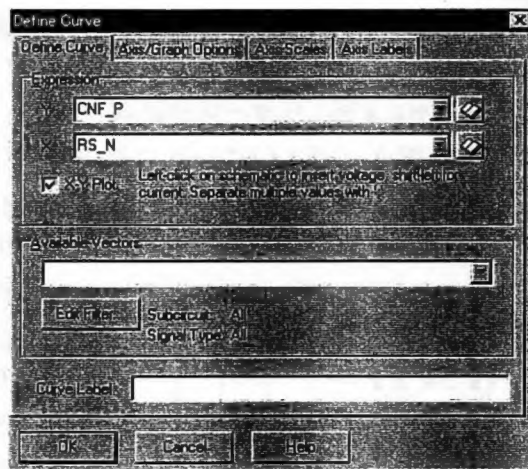




〈第 19 図〉 竹森幹郎氏の設計による EL 34(T) シングル・パワー・アンプ



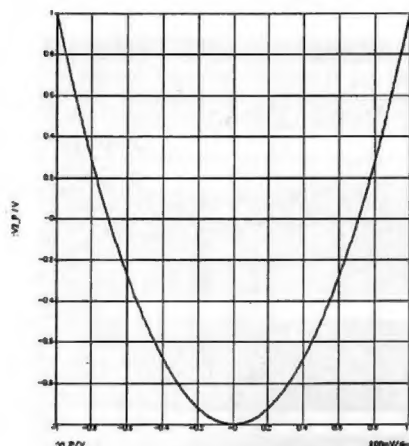
◀〈第 20 図〉  
過渡解析の設定。  
設定値は白枠内と  
◎の項で示されて  
いる



◀〈第 21 図〉  
Define Curve ダイア  
ログボックスの設定  
Y: 出力, X: 入力

入出力特性をシミュレーションします。本誌 2004 年 3 月号 p.146 第 8 図の回路をコピーし、開いてください。そして電圧線 V1 を 1 kHz/片ピーク振幅 2.5 V のサイン波に設定します (第 19 図)。

メニューから [Simulator] →



〈第 18 図〉 位相 45° の 1 kHz と 2 kHz のリサージュ

[Choose Analysis...] をクリックし、開いたダイアログボックスを第 20 図のように編集し、ダイアログボックスの [Run] ボタンをクリックします。

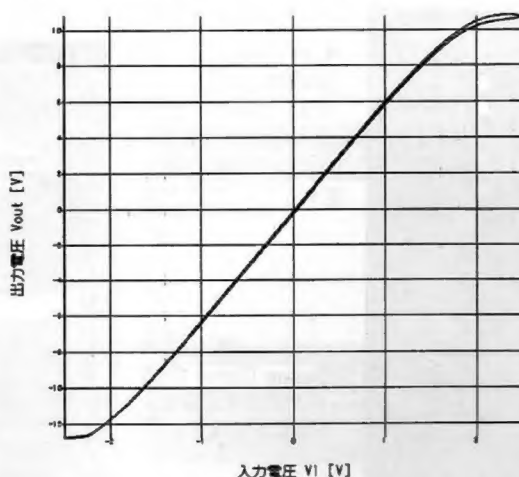
つぎにメニューから [Probe] → [Add Curve] をクリックし、開いた

ダイアログボックスを第 21 図のように編集します。Expression の Y は、第 19 図の回路図で十字カーソルを出力端子 (RL の + 側端子) に当てクリックすれば、自動的に入力されます。

つぎに X-Y Plot をチェックしてから、十字カーソルを V1 の + 側端子に当て、クリックします。第 21 図のように編集できたならば、ダイアログボックスの [OK] ボタンをクリックします。すぐに入出力特性のリサージュ図形 (第 22 図) が表示されます。

#### ◆引用文献

- (1) 竹森幹郎; EL 34(3 結) シングル・パワーアンプの製作, 2003 年 1 月号, pp. 77-84.
- (2) 拙稿; 実験トランジスタ・アンプ設計講座, 本誌 2004 年 3 月号 p. 146, 第 8 図.



〈第 22 図〉 第 18 図アンプの入出力特性, f=1 kHz